Física dos Materiais – 4300502

1º Semestre de 2016

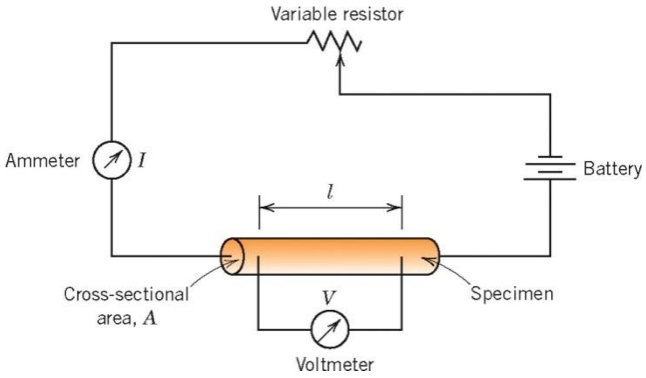
Instituto de Física
Universidade de São Paulo

Professor: **Luiz C C M Nagamine**
E-mail: nagamine@if.usp.br
Fone: 3091.6877
homepage: : http://disciplinas.stoa.usp.br/course/view.php?id=10070111

17 de maio

Propriedades Elétricas

Lei de Ohm $V = RI$



Resistividade

$$\rho = \frac{RA}{l} = \frac{VA}{Il}$$

Condutividade

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \qquad J = \sigma E$$

Metais = ~10^{7} $(\Omega m)^{-1}$

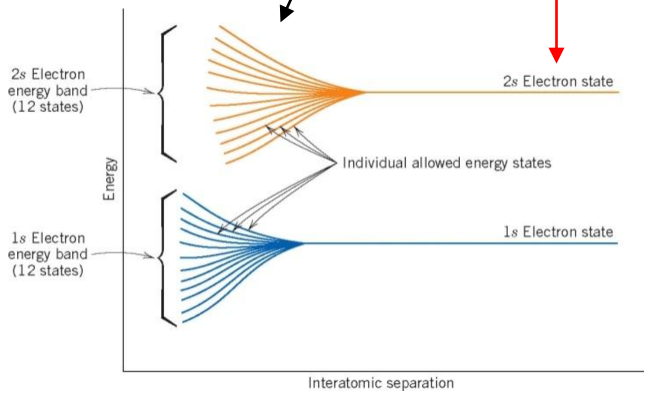
Isolantes = 10^{-10} ~10^{-20} $(\Omega m)^{-1}$

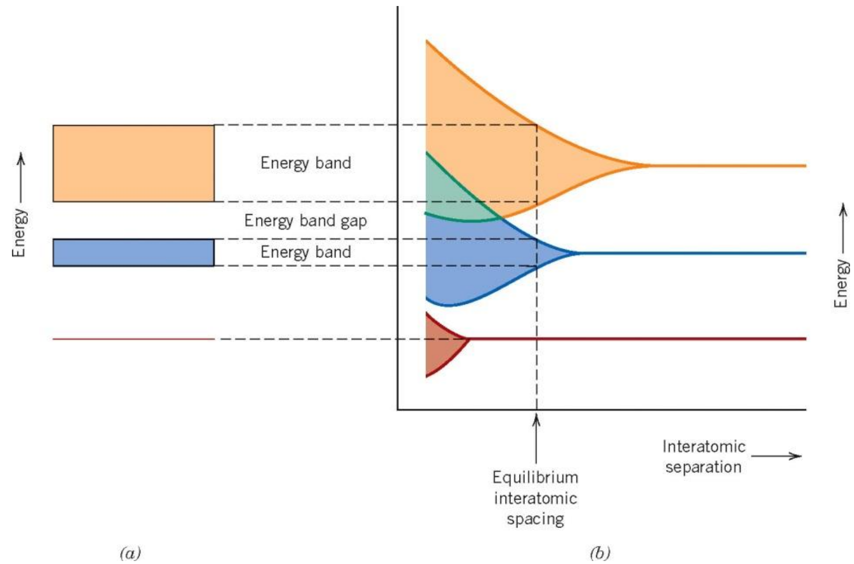
Semicondutores = 10^{-6} ~10^{4} $(\Omega m)^{-1}$

Propriedades Elétricas

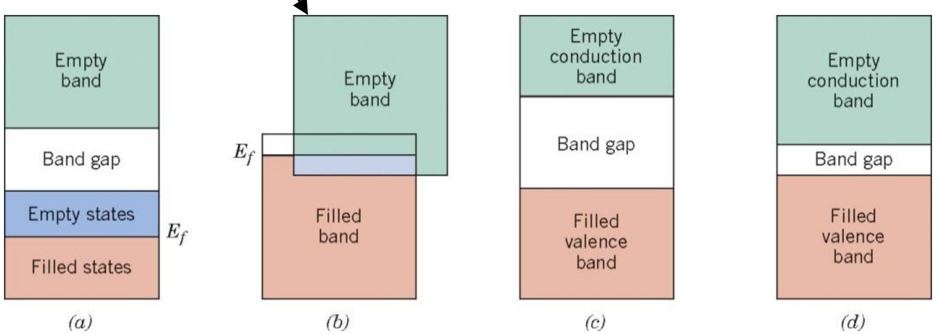
Estrutura de bandas em sólidos

Átomos isolados





Metais **Isolantes** **Semicondutores**



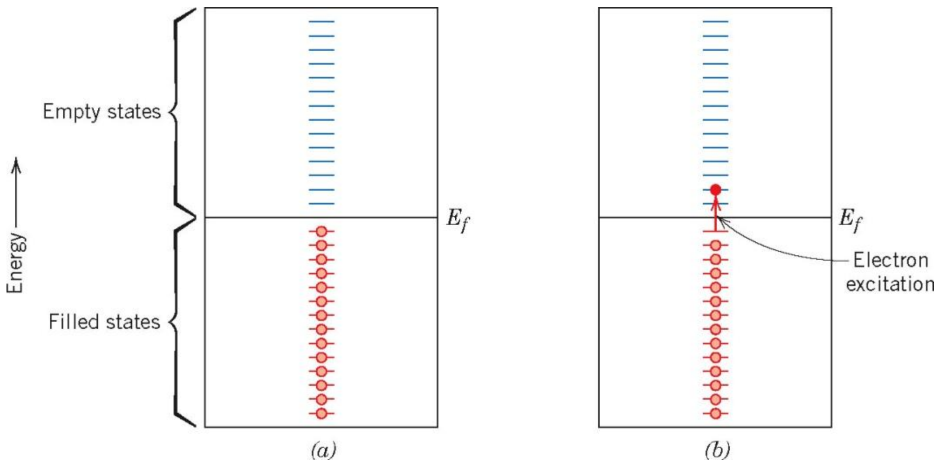
Banda de condução

Nível de Fermi

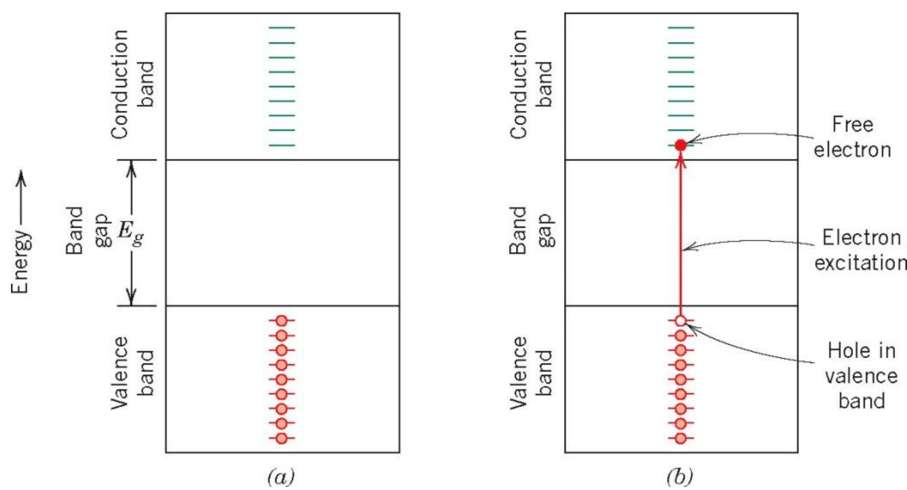
Banda de valência

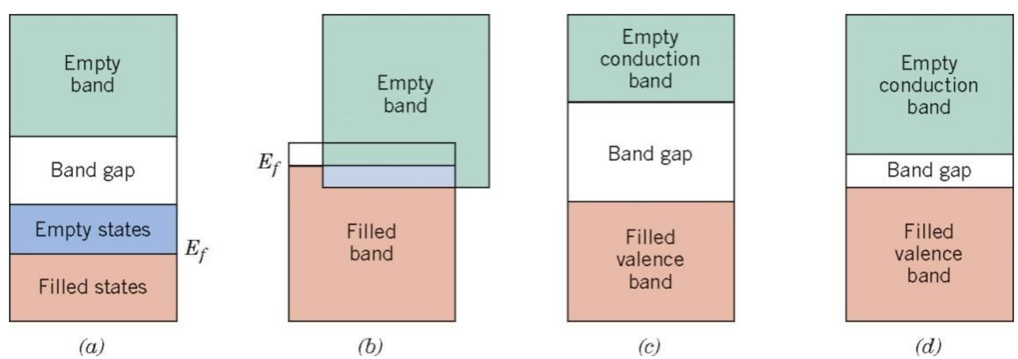
Propriedades Elétricas

Metais



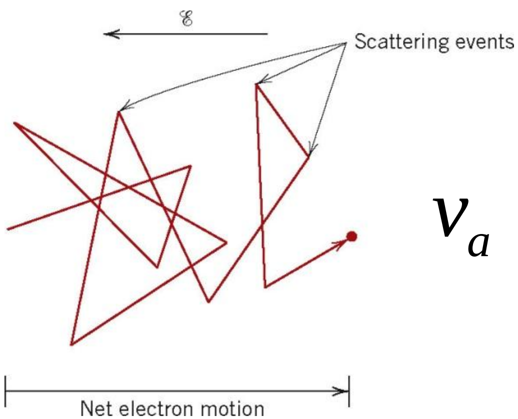
Isolantes e Semicondutores





Propriedades Elétricas

Mobilidade eletrônica (μ)



$$v_a = \mu_e E$$

Condutividade

$$\sigma = n|e|\mu_e$$

Table 18.1 Room-Temperature Electrical Conductivities for Nine Common Metals and Alloys

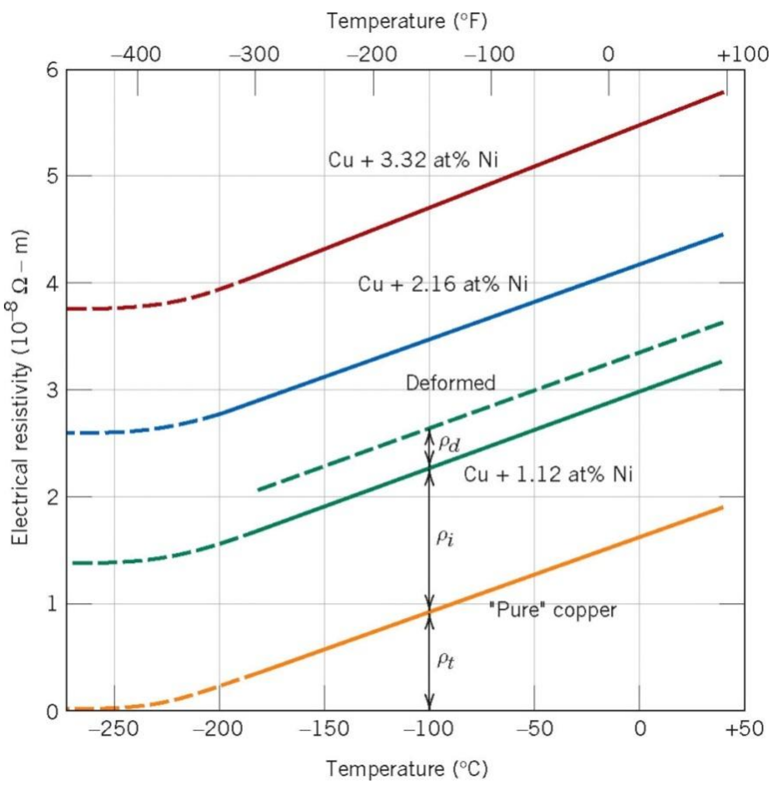
Metal	*Electrical Conductivity* $[(\Omega\text{-}m)^{-1}]$
Silver	6.8×10^7
Copper	6.0×10^7
Gold	4.3×10^7
Aluminum	3.8×10^7
Brass (70Cu–30Zn)	1.6×10^7
Iron	1.0×10^7
Platinum	0.94×10^7
Plain carbon steel	0.6×10^7
Stainless steel	0.2×10^7

Para metais:

$$\rho = \rho_t + \rho_i + \rho_d$$

Termos correspondentes à efeitos térmicos, de impurezas e de deformações

Propriedades Elétricas

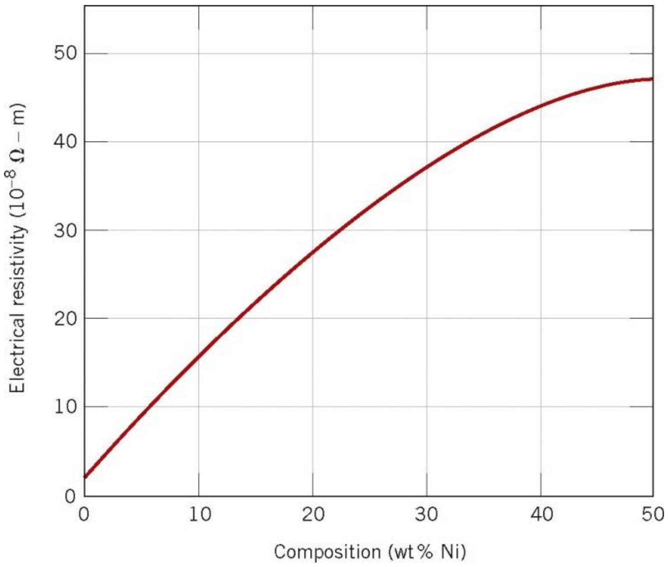


$$\rho_t = \rho_0 + aT$$

Efeitos de impurezas, temperatura e deformação

Solução sólida

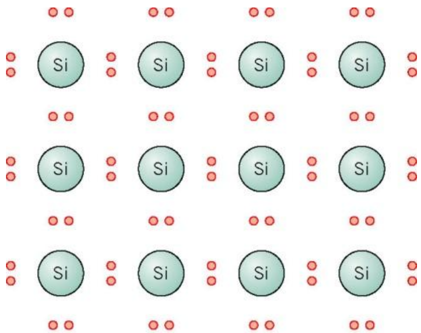
$$\rho_i = Ac_i(1 - c_i)$$



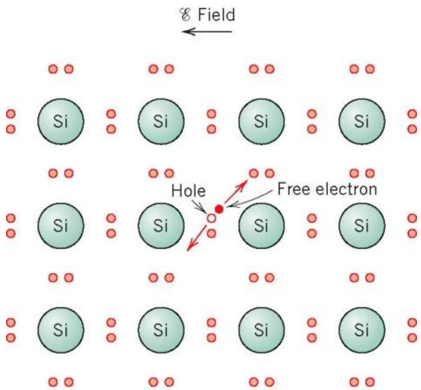
Duas fases

$$\rho_i = \rho_a V_a + \rho_b V_b$$

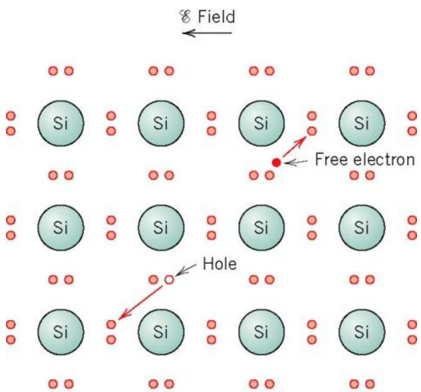
Semicondutores



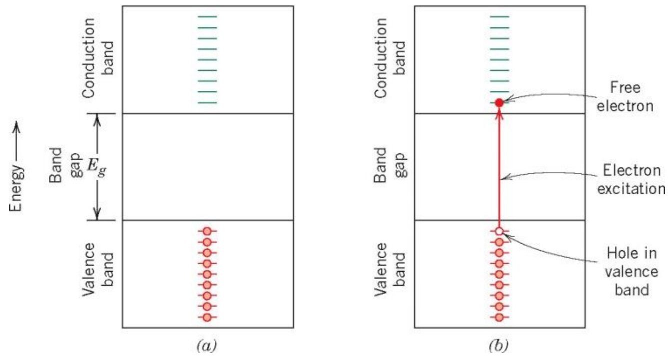
(a)



(b)



(c)



Condutividade intrínsica

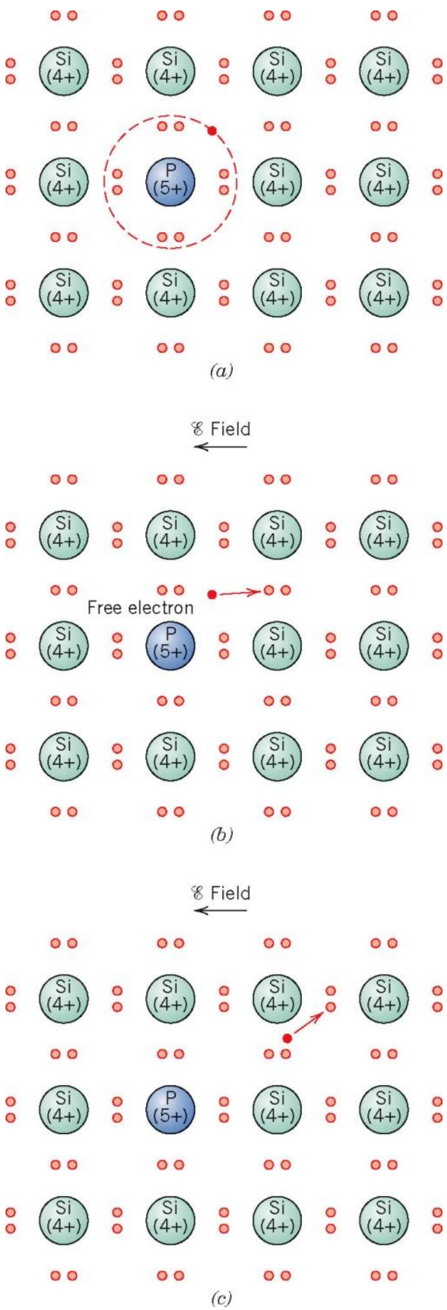
$$\sigma = n|e|\mu_e + p|e|\mu_b$$

Por elétrons e buracos

$$\mu_e > \mu_b$$

Table 12.2 Band Gap Energies, Electron and Hole Mobilities, and Intrinsic Electrical Conductivities at Room Temperature for Semiconducting Materials

Material	*Band Gap (eV)*	*Electrical Conductivity* $[(\Omega\text{-}m)^{-1}]$	*Electron Mobility* $(m^2/V\text{-}s)$	*Hole Mobility* $(m^2/V\text{-}s)$
		Elemental		
Si	1.11	4×10^{-4}	0.14	0.05
Ge	0.67	2.2	0.38	0.18
		III–V Compounds		
GaP	2.25	—	0.05	0.002
GaAs	1.42	10^{-6}	0.85	0.45
InSb	0.17	2×10^4	7.7	0.07
		II–VI Compounds		
CdS	2.40	—	0.03	—
ZnTe	2.26	—	0.03	0.01



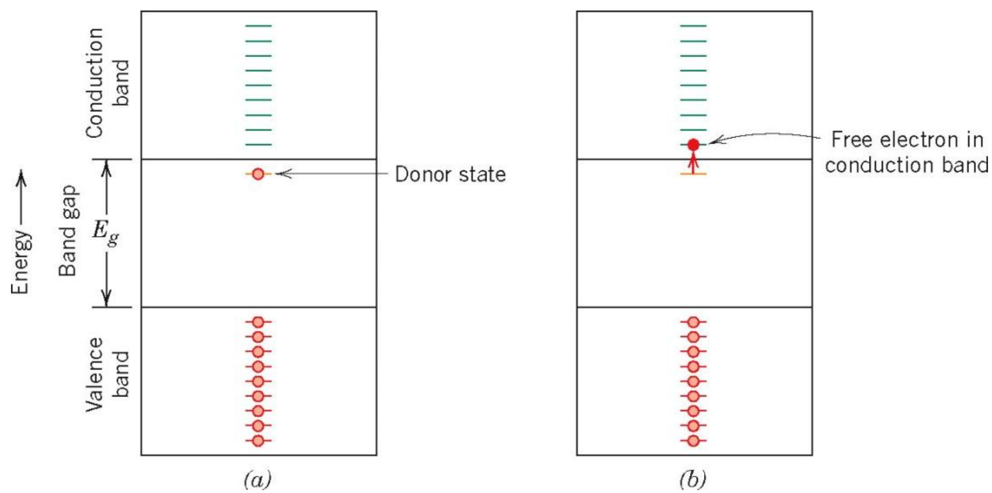
Semicondutores extrínsicos

Tipo n

Condutividade

$$\sigma = n|e|\mu_e + p|e|\mu_b$$

Por elétrons e buracos



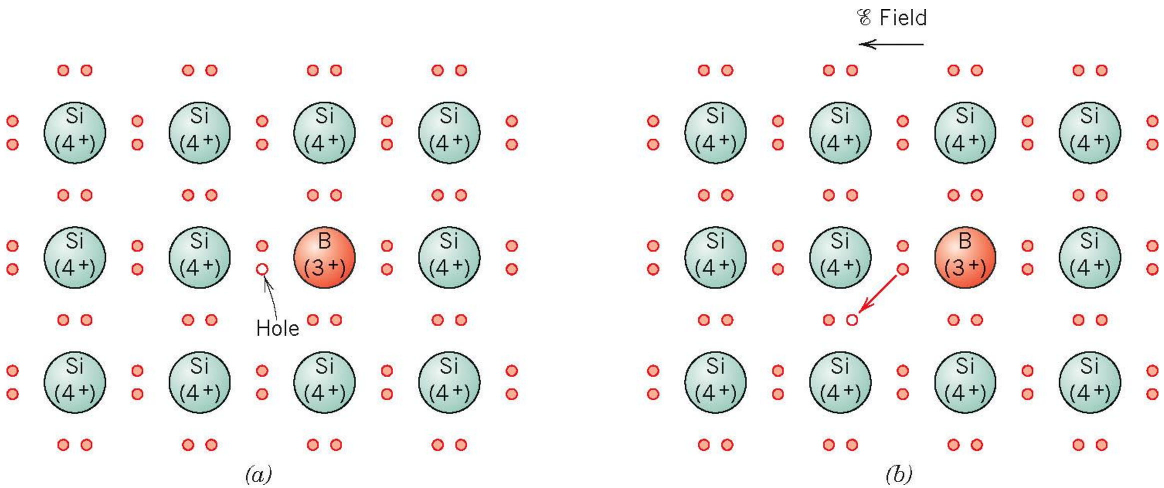
Semicondutores extrínsicos

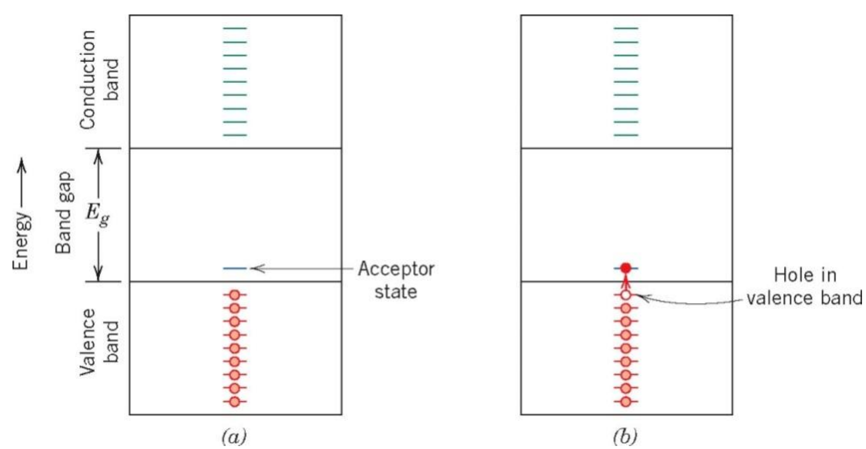
Tipo p

Condutividade

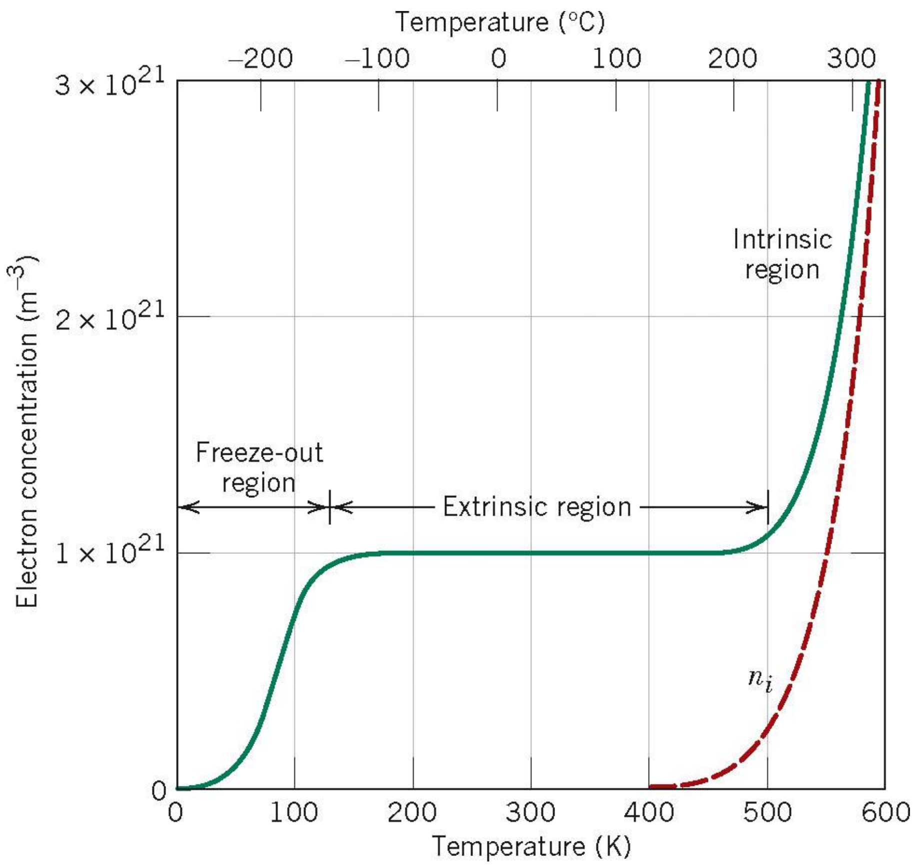
$$\sigma = n|e|\mu_e + p|e|\mu_b$$

Por elétrons e buracos





Semicondutores extrínsicos



Condutividade

$$\sigma = n|e|\mu_e + p|e|\mu_b$$

Por elétrons e buracos

Variação com a temperatura da condutividade

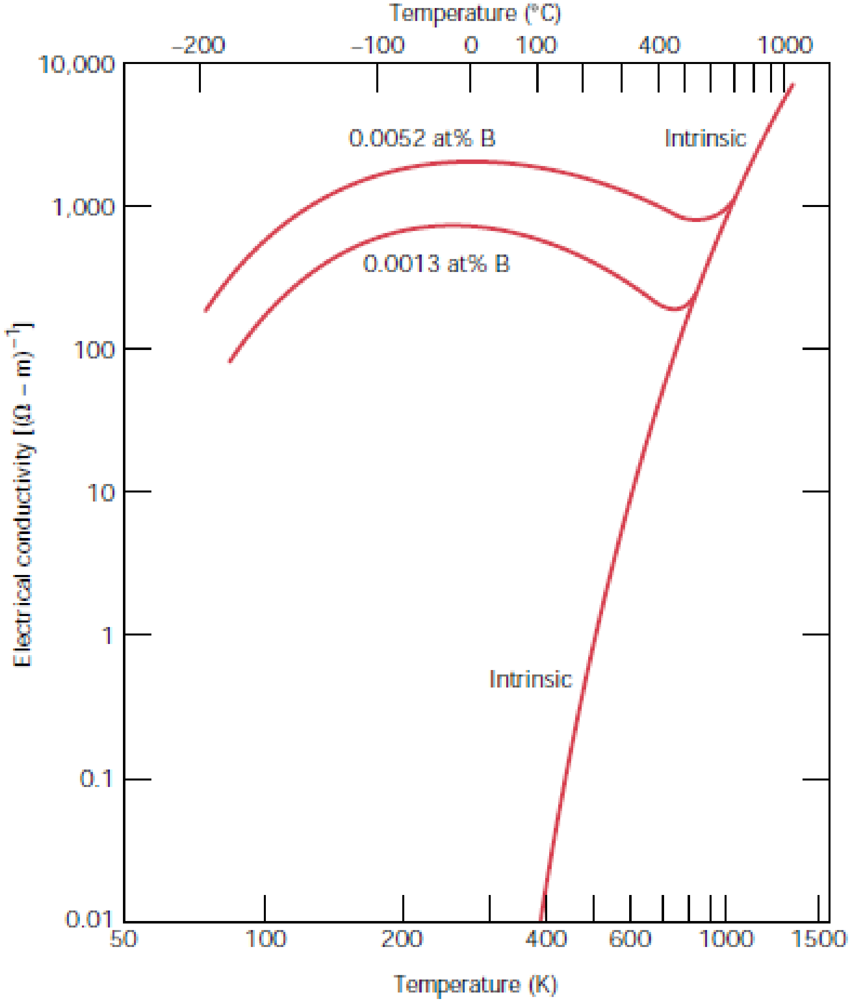


Figure 12.15 The temperature dependence of the electrical conductivity (log–log scales) for intrinsic silicon and boron-doped silicon at two doping levels. [Adapted from G. L. Pearson and J. Bardeen, *Phys. Rev.*, **75**, 865 (1949).]

A dependência da condutividade intrínseca com a temperatura é aproximadamente:

$$\ln \sigma \cong C - \frac{E_g}{2kT}$$

A dependência dos portadores de carga com a temperatura é aproximadamente

$$\ln n = \ln p \cong C' - \frac{E_g}{2kT}$$

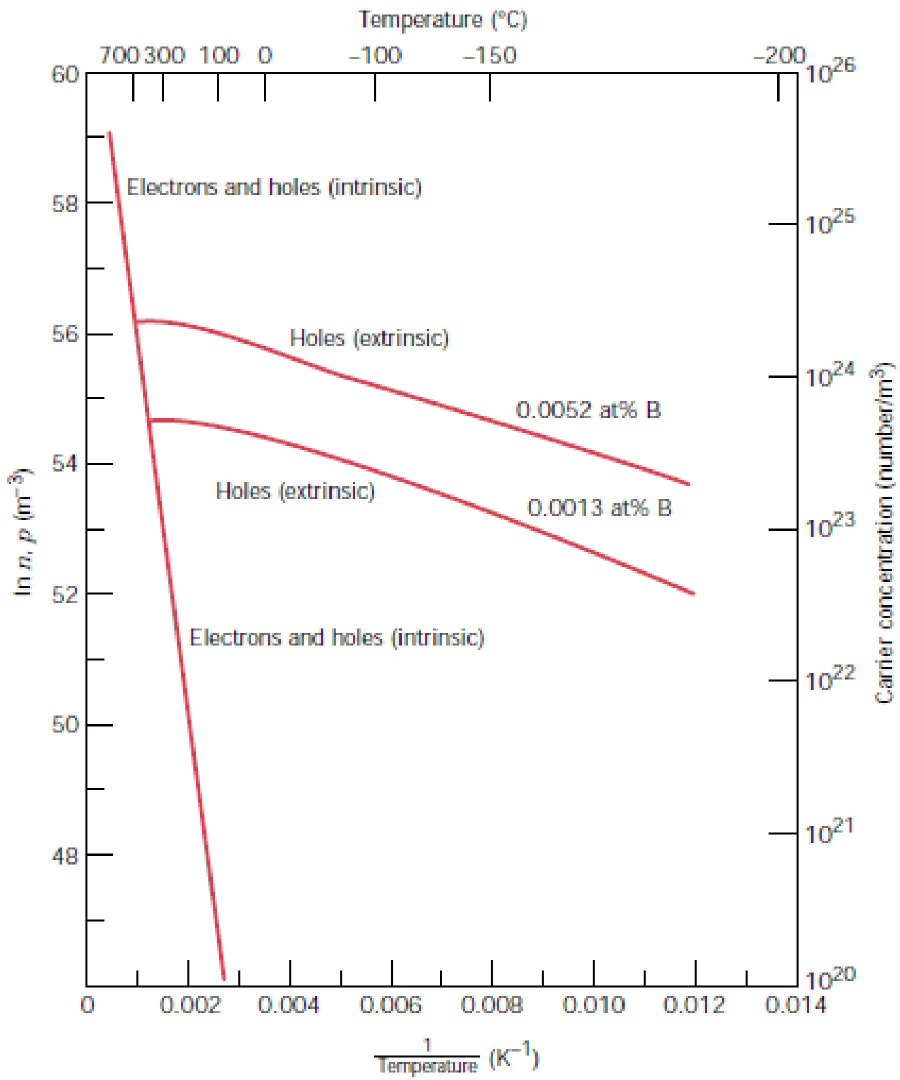


Figure 12.16 The logarithm of carrier (electron and hole) concentration as a function of the reciprocal of the absolute temperature for intrinsic silicon and two boron-doped silicon materials. (Adapted from G. L. Pearson and J. Bardeen, *Phys. Rev.*, **75**, 865, 1949.)

$$E_g = -2k\left(\frac{\Delta \ln p}{\Delta(1/T)}\right)$$

$$= -2k\left(\frac{\Delta \ln n}{\Delta(1/T)}\right)$$

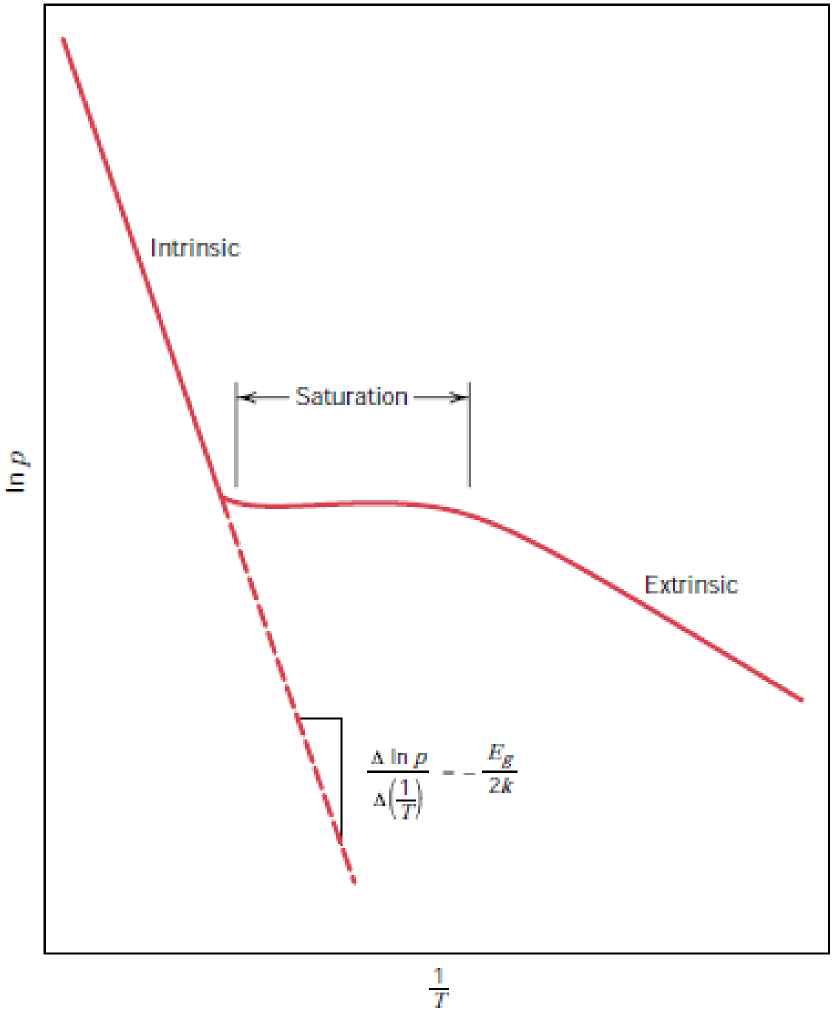


Figure 12.17 Schematic plot of the natural logarithm of hole concentration as a function of the reciprocal of absolute temperature for a *p*-type semiconductor that exhibits extrinsic, saturation, and intrinsic behavior.

Exemplo 1

Phosphorus is added to high-purity silicon to give a concentration of 10^{23} m^{-3} of charge carriers at room temperature.

(a) Is this material *n*-type or *p*-type?

(b) Calculate the room-temperature conductivity of this material, assuming that electron and hole mobilities are the same as for the intrinsic material.

(a) Phosphorus is a Group VA element (Figure 2.6) and, therefore, will act as a donor in silicon. Thus, the 10^{23} m^{-3} charge carriers will be virtually all electrons. This electron concentration is greater than that for the intrinsic case (1.33×10^{16} m^{-3}, Example Problem 12.1); hence, this material is extrinsically *n*-type.

(b) In this case the conductivity may be determined using Equation 12.16, as follows:

$$\sigma = n|e|\mu_e = (10^{23}\ m^{-3})(1.6 \times 10^{-19}\ C)(0.14\ m^2/V\text{-}s)$$

$$= 2240\ (\Omega\text{-}m)^{-1}$$

Exemplo 2-

If the room-temperature [25°C (298 K)] electrical conductivity of intrinsic germanium is 2.2 $(\Omega\text{-m})^{-1}$, estimate its conductivity at 150°C (423 K).

$$C = \ln \sigma + \frac{E_g}{2kT}$$

$$= \ln(2.2) + \frac{0.67\ \text{eV}}{(2)(8.62 \times 10^{-5}\ \text{eV/K})(298\ \text{K})} = 13.83$$

A condutividade a 150°C (423 K):

$$\ln \sigma = C - \frac{E_g}{2kT}$$

$$= 13.83 - \frac{0.67\ \text{eV}}{(2)(8.62 \times 10^{-5}\ \text{eV/K})(423\ \text{K})} = 4.64$$

$$\sigma = 103.8\ (\Omega\text{-m})^{-1}$$

Dispositivos Semicondutores

Junção p-n

Diodos

Processo de produção

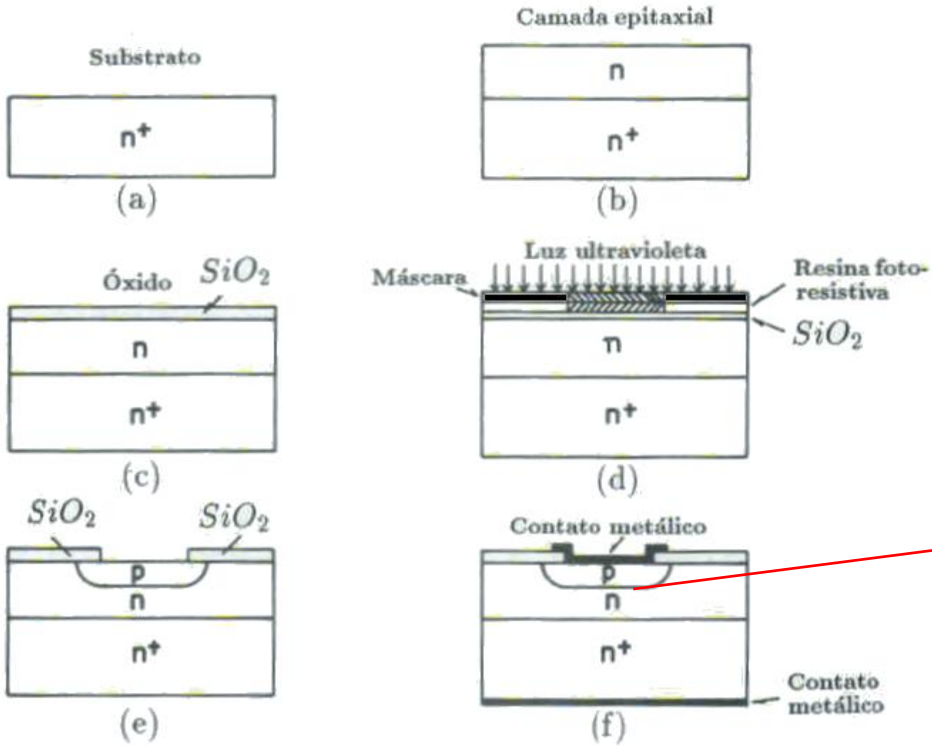


Figura 6.1: Etapas da fabricação de um diodo de junção *p-n* com a tecnologia planar: (a) pastilha de Si usada como substrato; (b) substrato com camada de Si epitaxial dopado com impurezas tipo *n*; (c) camada óxida sobre o Si; (d) ilustração do processo de fotolitografia para polimerizar certas regiões da resina foto-resistiva; (e) difusão de impurezas tipo *p* através da janela aberta no óxido; (f) estrutura completa do diodo de junção com contatos metálicos.

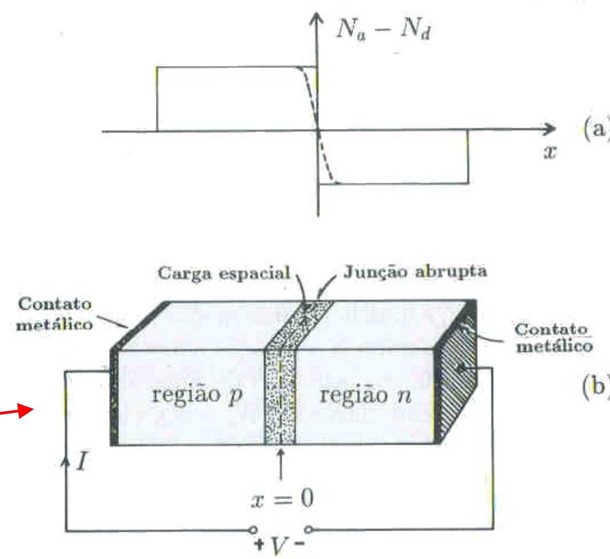
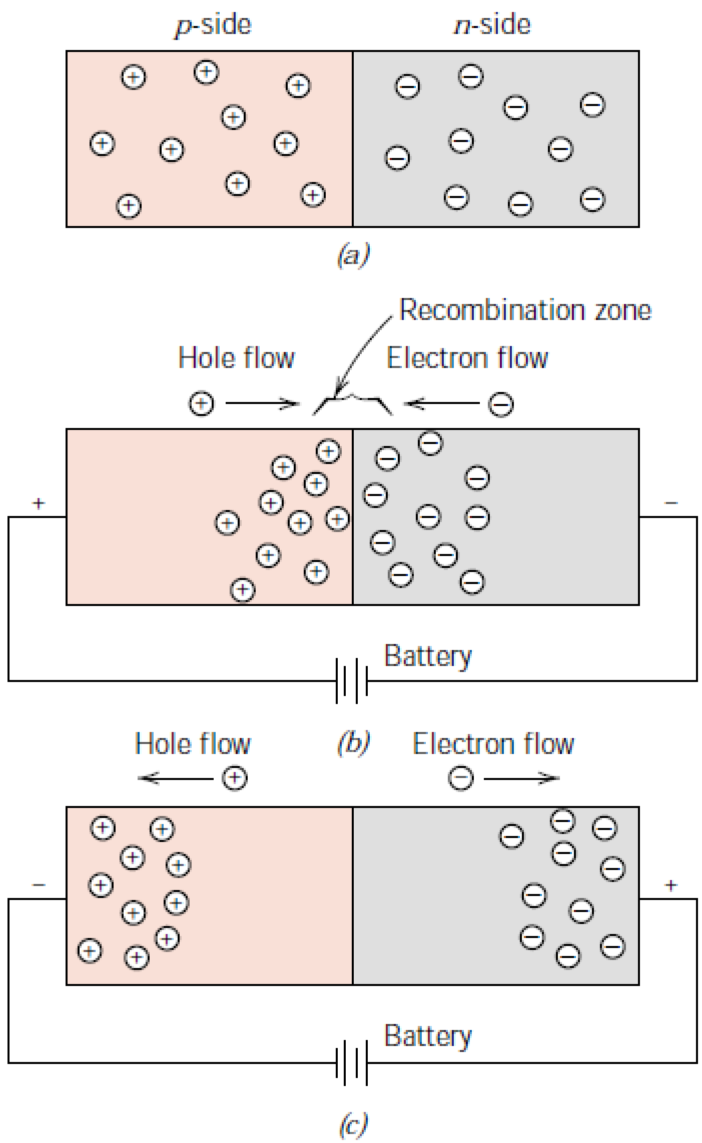
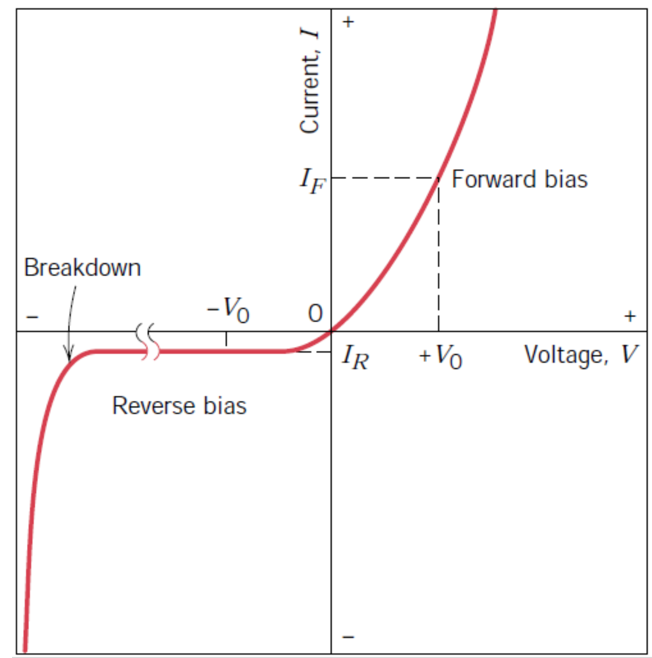


Figura 6.2: (a) Variação da concentração de impurezas numa junção *p-n*. A linha tracejada representa a variação numa junção real enquanto a linha cheia representa uma junção abrupta ideal. (b) Modelo de junção abrupta unidimensional.



p-side
n-side
Recombination zone
Hole flow
Electron flow
Battery
Hole flow
Electron flow
Battery

(a)
(b)
(c)



Current, I
I_F
Forward bias
Breakdown
$-V_0$
0
I_R
$+V_0$
Voltage, V
Reverse bias

Dispositivos Semicondutores

Junção p-n

Diodos

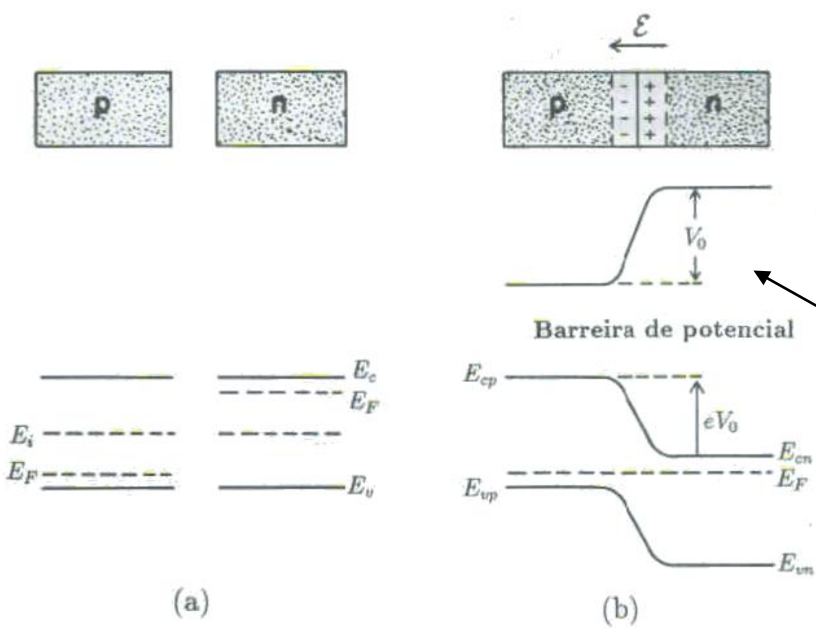


Figura 6.3: (a) Semicondutores p e n separados. (b) Carga, campo elétrico, potencial e níveis de energia na região de carga espacial de junção p-n.

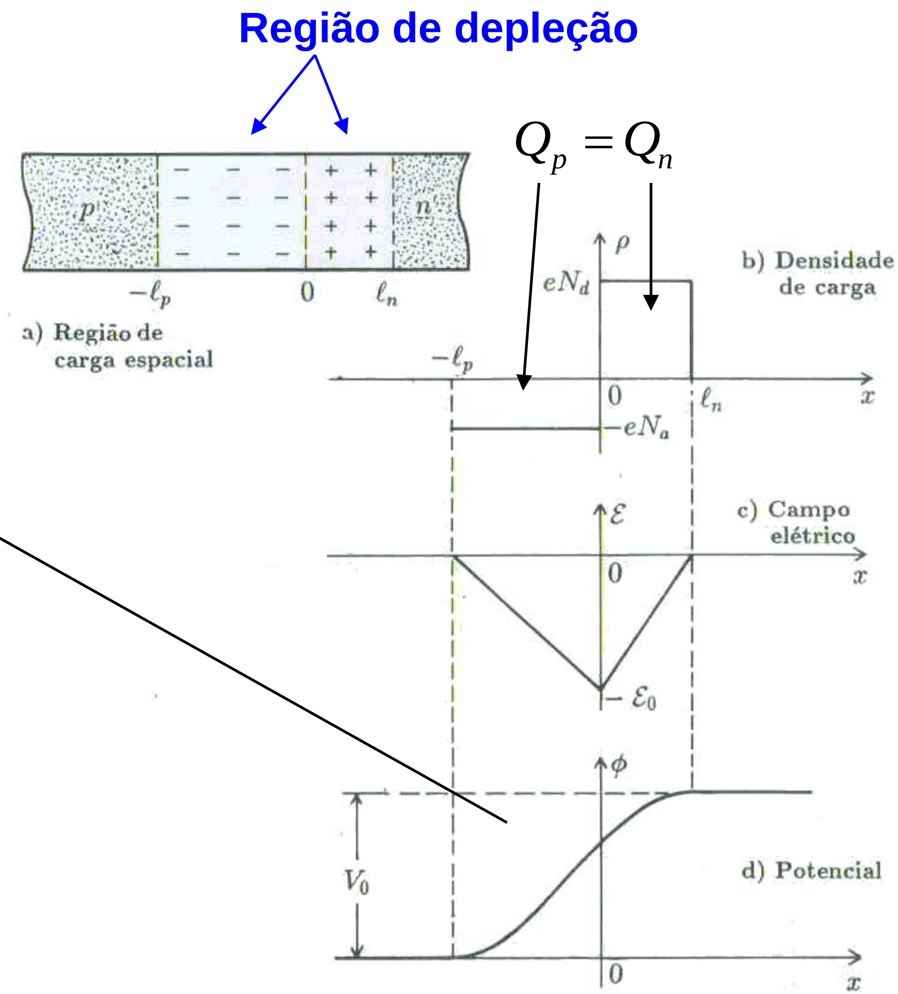


Figura 6.4: Variação da densidade de carga, campo elétrico e potencial eletrostático no modelo unidimensional da junção p-n.

Dispositivos Semicondutores

Junção p-n

Diodos

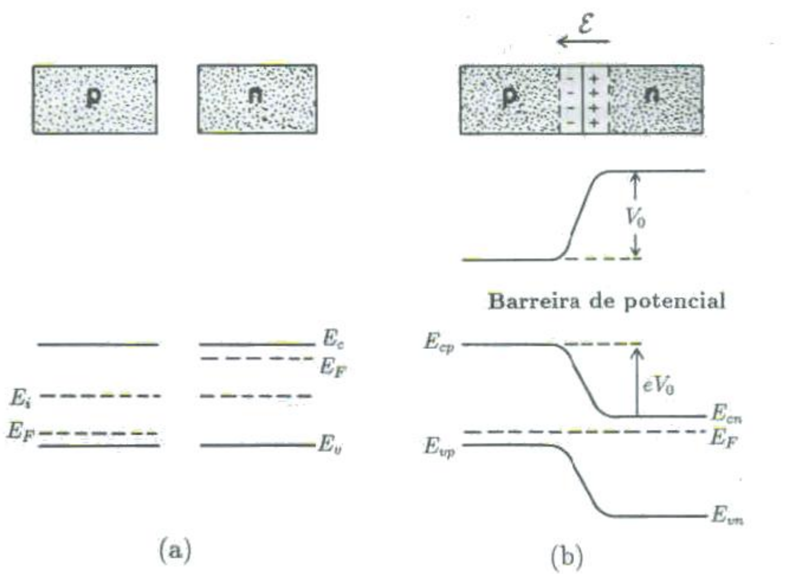
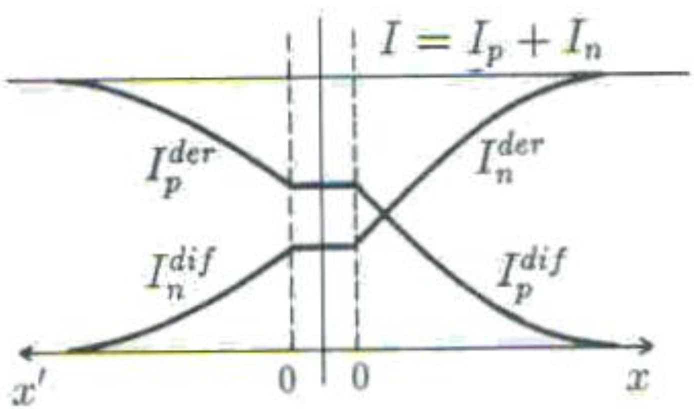


Figura 6.3: (a) Semicondutores p e n separados. (b) Carga, campo elétrico, potencial e níveis de energia na região de carga espacial de junção p-n.

Correntes na região de depleção



Dispositivos Semicondutores

Junção p-n

Diodos

Região de depleção

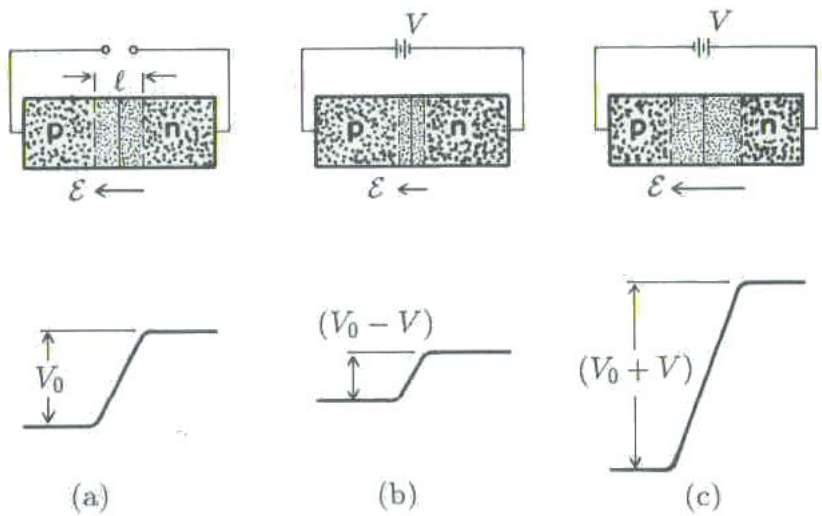


Figura 6.5: Efeito de tensão externa na espessura da região de carga espacial e na altura da barreira de potencial: (a) situação em equilíbrio; (b) polarização direta; (c) polarização reversa.

Corrente elétrica em um diodo

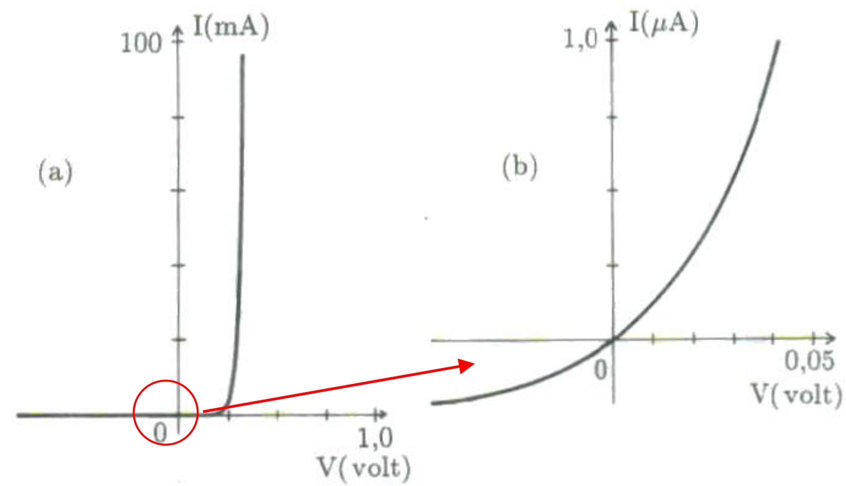
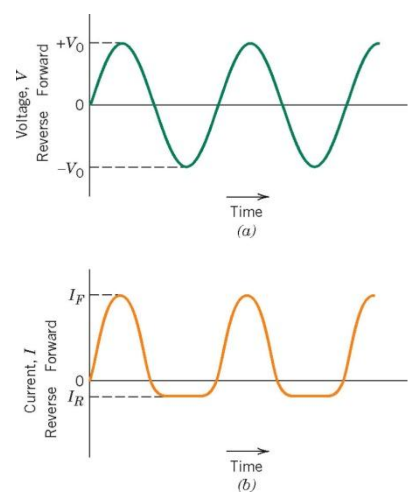
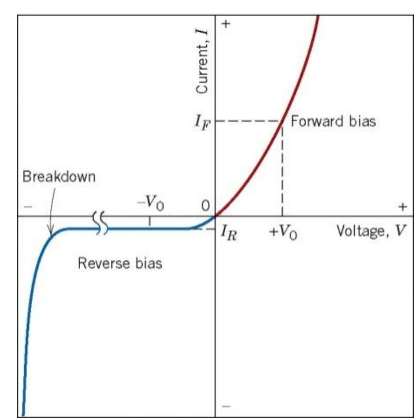


Figura 6.7: Característica I-V de junção p-n ideal dada pela equação do diodo com $I_s = 0,25\ \mu A$, valor adequado para uma junção de germânio. A curva em (b) é a mesma que em (a), feita em escala ampliada para mostrar o comportamento em torno da origem.





Dispositivos Semicondutores

Transístor bipolar

Transístor p-n-p

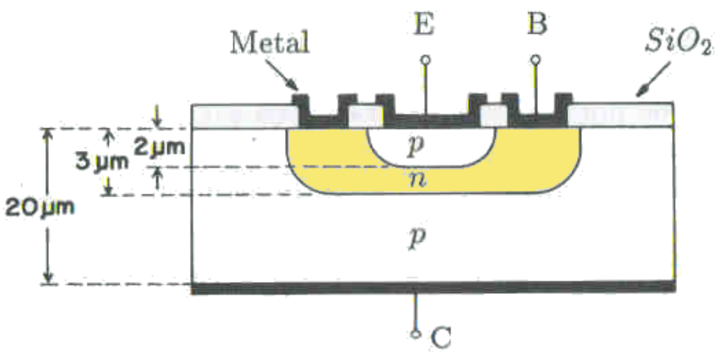


Figura 7.2: Estrutura planar do transistor bipolar de junção com algumas dimensões típicas. As letras E, B e C representam os terminais do emissor, da base e do coletor, respectivamente. As distâncias indicadas representam espessuras típicas.

Corrente elétrica em um transístor

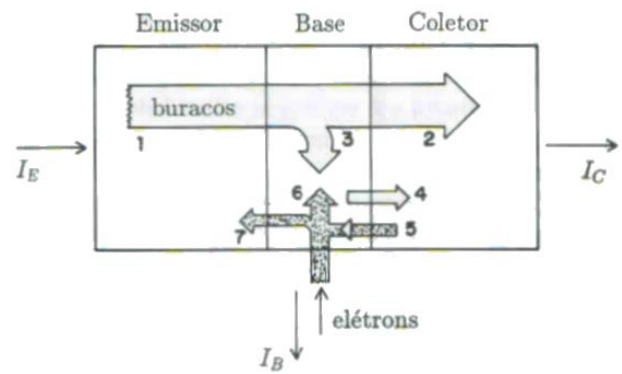
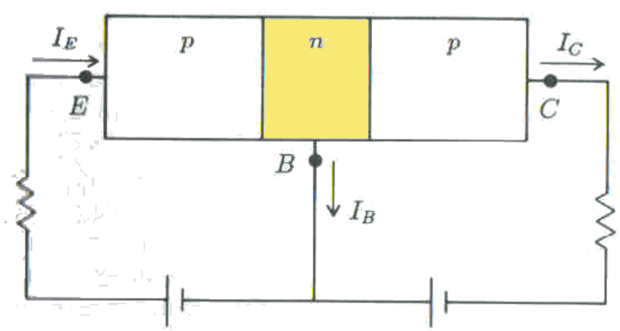
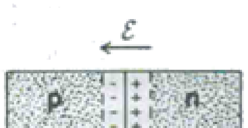
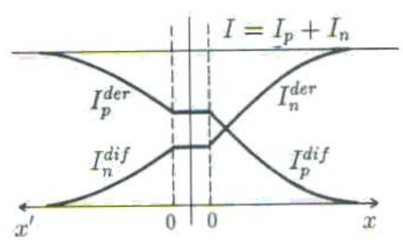


Figura 7.4: Ilustração do fluxo de elétrons e de buracos em transistor *p-n-p*: 1- Buracos em movimento de deriva no emissor; 2- Buracos que atingem o coletor em movimento de difusão; 3- Buracos que desaparecem na base por recombinação; 4 e 5- Buracos e elétrons gerados termicamente na base e que formam a corrente de saturação reversa da junção do coletor; 6- Elétrons que recombinam com os buracos da componente 3; 7- Elétrons injetados da base para o emissor formando a corrente I_{E_n}.

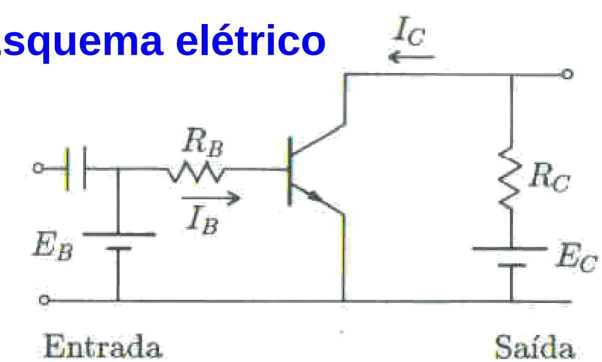






Correntes na região de depleção

Esquema elétrico



Transístor p-n-p

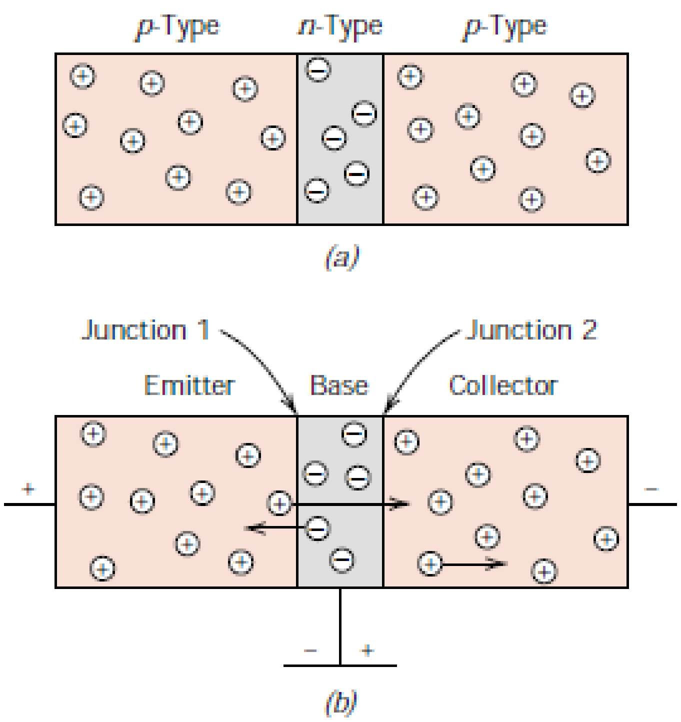
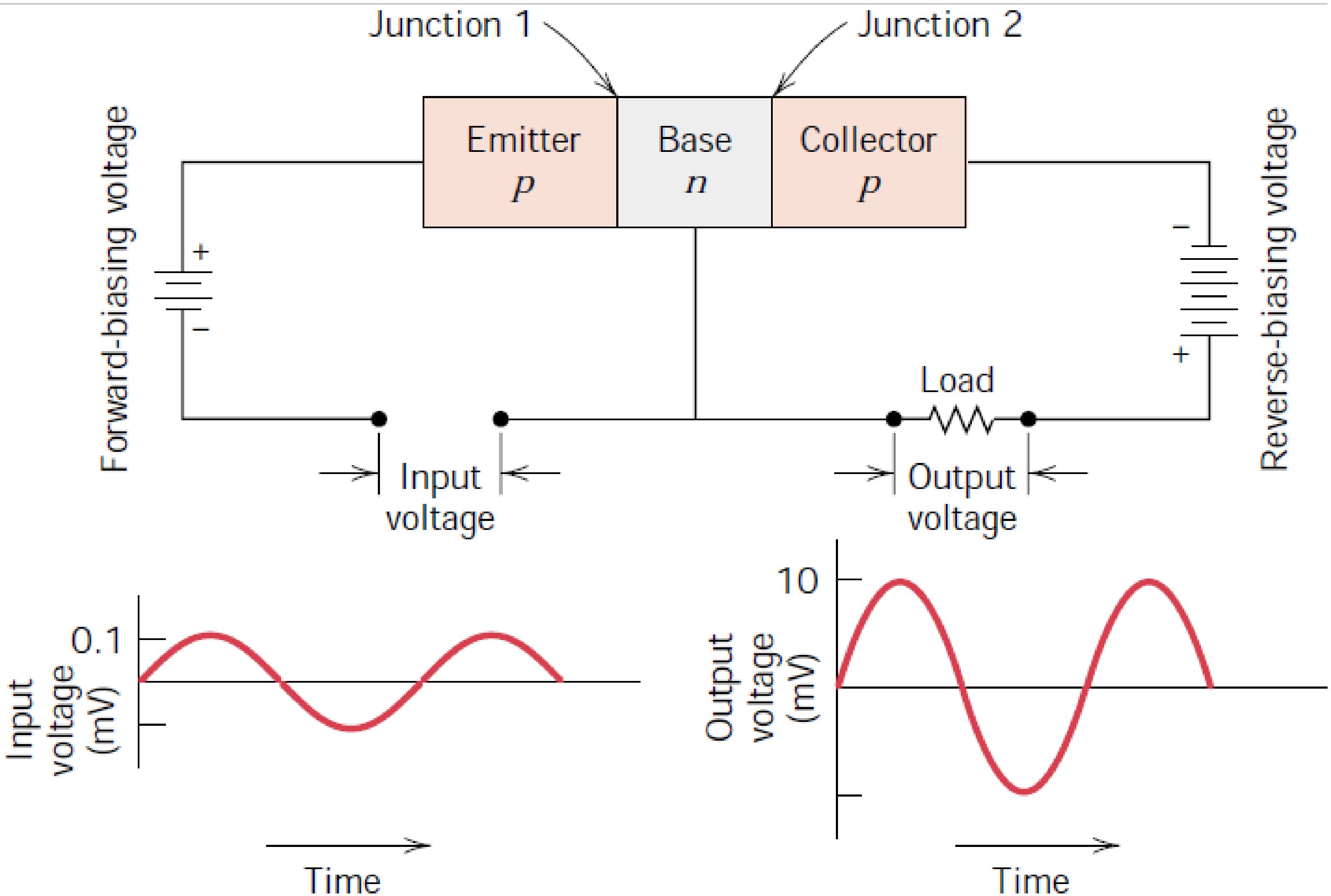


Figure 12.23 For a junction transistor (p–n–p type), the distributions and directions of electron and hole motion (*a*) when no potential is applied and (*b*) with appropriate bias for voltage amplification.


Junction 1
Junction 2
Emitter
p
Base
n
Collector
p
Forward-biasing voltage
Reverse-biasing voltage
+
−
Load
Input voltage
Output voltage
0.1
Input voltage (mV)
Time
10
Output voltage (mV)
Time